

第199回
地震予知連絡会資料

2013年5月30日

統計数理研究所

時空間非定常BPTモデルによる北日本太平洋沖沈み込み帯の小繰り返し地震(1993.7.15-2011.3.10)

の統計解析 —特に $M \geq 7$ 地震の前と後の変化について—

Nonstationary space-time BPT model, and statistical analysis of repeating earthquakes on the upper surface of the subducting Pacific Plate from July 15, 1993 till March 10, 2011, on emphasis of before and after major earthquakes.

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

東北大学大学院理学研究科

Graduate School of Science, Tohoku University

前回(第198回)の地震予知連絡会で、Brownian Passage Time (BPT) 更新過程を拡張して非定常時空間階層ベイズモデルを開発¹⁾し、応力蓄積率の時空間的変化の推定結果の第一報を報告した。北日本太平洋沖のプレート境界における1993年7月15日から2011年3月11日までの繰り返し地震(670系列)に上記モデルを適用しすべり速度分布の推定を行った。繰り返し地震のマグニチュードと発生間隔からNadeau and Johnson の関係式²⁾を用いてすべり速度へと変換を行っている。モデルにおいて3次元B-スプライン関数で場所と時間による連続的な応力の変化を表現し、過剰な適合を避けるために、時間変動や空間変動の平滑性について制約を設定し、赤池ベイズ情報量規準(ABIC)の最小化に従った。その結果、例えば次の様相が見られた。(1)1994年12月三陸はるか沖地震(M7.6)後、西側余震域ですべりが加速している。(2)2003年9月十勝沖地震(M8.0)後に余効すべりが北東へ拡大して2004年11月釧路沖地震(M7.1)の震源南西付近まですべりが加速している²⁾。(3)2008年5月に茨城県沖地震(M7.0)があったが、2008年初めから2009年末までの長期間、北関東沖から宮城沖にかけての広範囲ですべり加速が起こっている。(4)2011年3月東北太平洋沖地震(M9.0)の震源のやや北側で半年以上前から繰り返し地震が活発化している。また、最大前震である2011年3月9日東北沖(M7.3)の余震活動も繰り返し地震に含まれている。

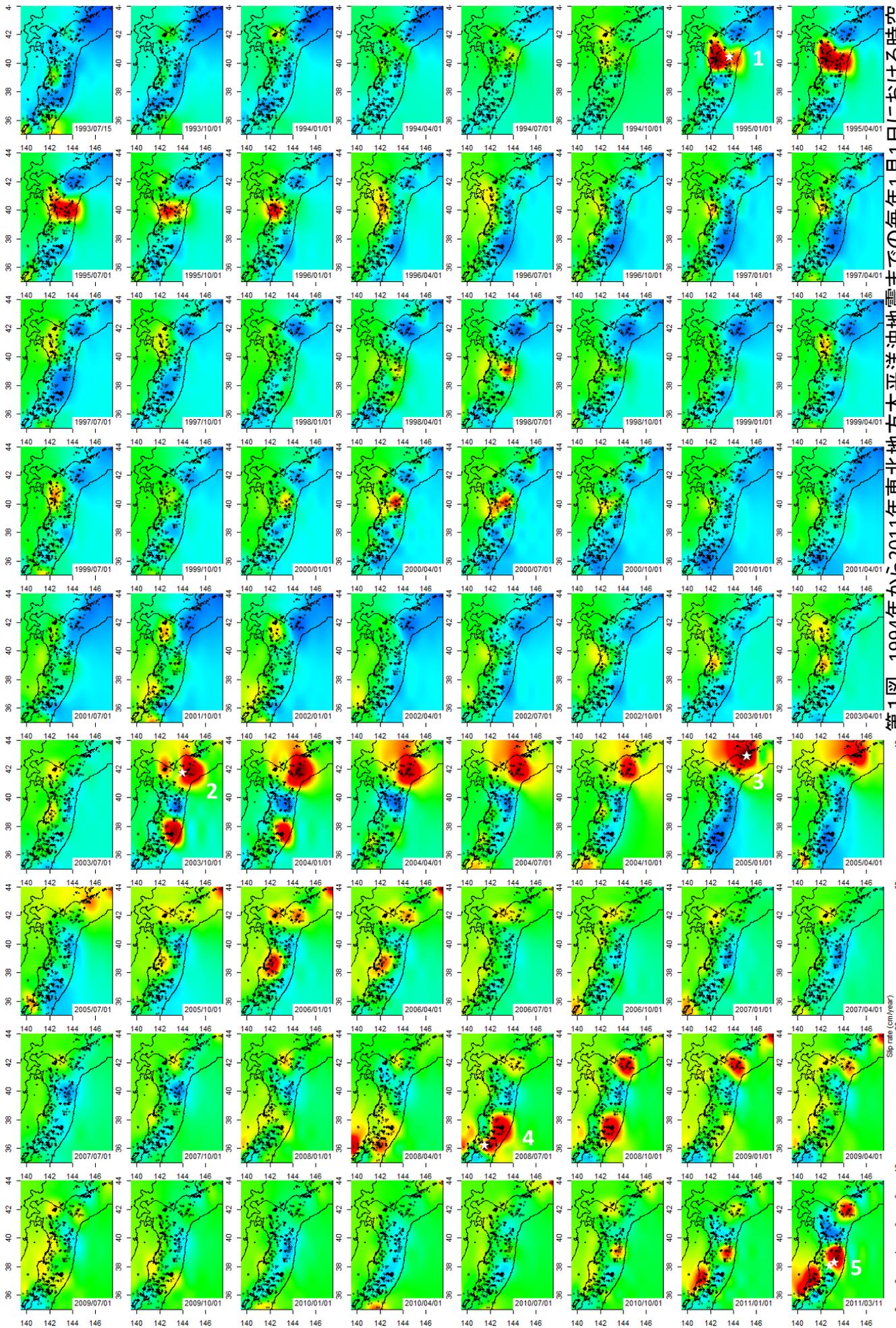
前回の予知連に提出された結果との違いは、繰り返し地震活動を大きく変化させた主要地震、すなわち1994年三陸はるか沖地震(M7.6)、2003年9月十勝沖地震(M8.0)、2004年11月釧路沖地震(M7.1)、2008年茨城県沖地震(M7.0)、東北沖M9地震の2011年3月9日最大前震(M7.3)について、その直前約1年間のslip-rateを別途分離して推定した点である。そのため、主要地震前のslip-rateが地震後のslip-rateに引っ張られるという現象は回避されている。

その結果示唆された主要地震前後のすべり速度の変化の特徴は以下のとおりである。(5) 三陸はるか沖地震前に震源域、深部や浦河沖に加速が見られ、本震直前に震源域全体で急減速している。震源域東側は西側(深部)に比べて早くすべり速度が低下している。2000年に原因不明の加速が見られる。(6) 十勝沖地震震源域では、本震前の西方深部プレート境界(浦河沖)にすべりの加速が見られる。本震後少し遅れてすべりが急加速し、それらは沖合の方で規模が大きい。これらのすべりは釧路沖地震を契機に急減速しているが1年かけて回復している。2008年9月の地震(M7.1)を契機に繰り返し地震が多数トリガーされて、2003年の本震前よりも高いすべりレートが続いていたが、2011年東北沖地震前にトレンチ寄りですべり急加速がみられる。(7) 釧路沖震源域と周辺においては十勝沖地震後やや遅れてすべり速度増えた後に2004年11月釧路沖地震(M7.1)直前で減速している。本震後大規模なすべりがあり、1年かけて減少している。(8) 2005年8月16日宮城県沖地震(M7.2)の余効すべりは遅れて加速している。(9) 福島県はるか沖では宮城県はるか東方の1998年5月31日の地震(M6.3)を契機として加速が見られる⁴⁾。福島県はるか沖地域の2003年10月(M6.8)および2008年07月(M6.9)の地震を契機に繰り返し地震が多数トリガーされている。(10) 2008年5月以降、茨城県沖地震の当該領域や周辺領域において、2009年末までの長期間、北関東沖から宮城沖にかけての広範囲で顕著なすべり加速が起こっている。(11) 2011年3月11日東北太平洋沖地震(M9.0)震源の周辺領域では、2010年後半より震源のやや北を基点として加速しはじめ、活動が徐々に南下して最終的に3月9日の最大前震(M7.3)および本震に繋がっている。同時に福島県沖の深部プレート境界や十勝沖震源域浅部で加速している。

(野村俊一, 内田直希, 尾形良彦)

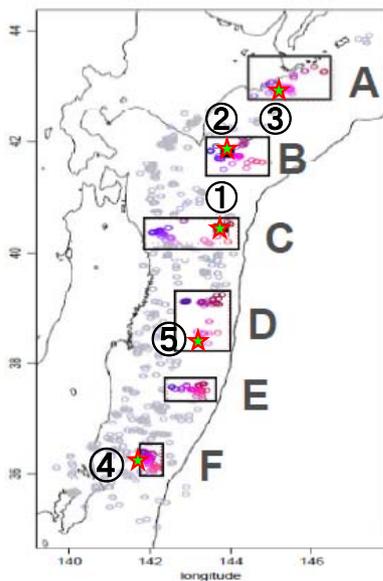
参考文献

- 1) 野村俊一 (2012) 総合研究大学院大学博士学位論文.
- 2) Nadeau and Johnson (1998) Bull. Seismol. Soc. Amer., 88, 790-814
- 3) Uchida, N. et al. (2009). Earth Planet. Sci. Lett., 283, 111-121.
- 4) Uchida, N. et al. (2003).. Geophys. Res. Lett., 30, 1801, doi:10.1029/2003GL017452.



第1図. 1994年から2011年東北地方太平洋沖地震までの毎年1月1日における時空間ストレス蓄積率のスナップショット. カラーテーブルはすべり速度のcm/年の単位

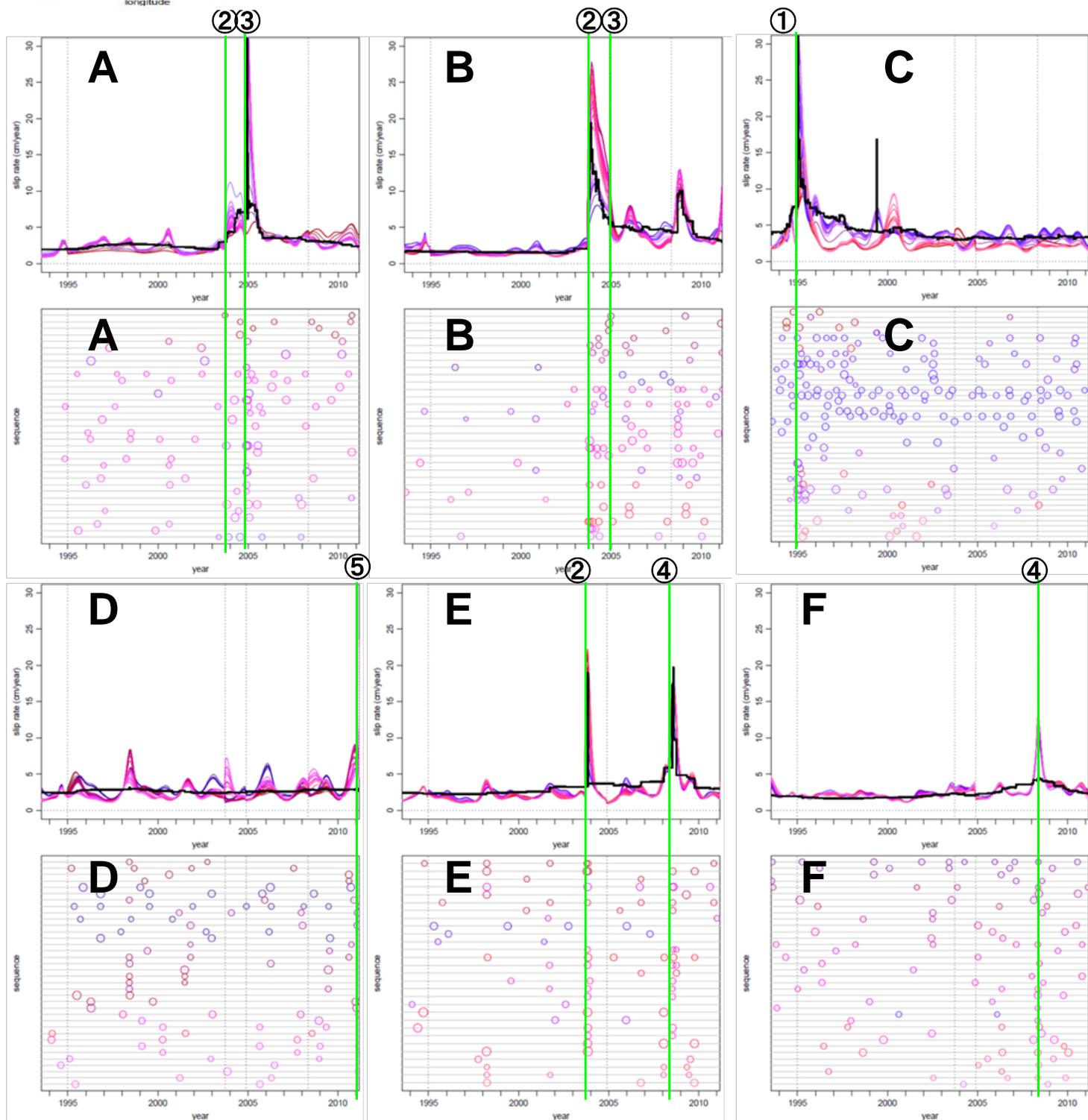
Fig. 1. Snapshots of space-time loading rate at 1st January of each year from 1994 till the 2011Tohoku earthquakeColor table in bottom right shows slip-rate with unit of cm/year (cf., reference 3)..



- ①: 1994.12.28
M7.6 三陸はるか沖
- ②: 2003.09.26
M8.0 十勝沖
- ③: 2004.11.29
M7.1 釧路沖
- ④: 2008.05.08
M7.0 茨城県沖
- ⑤: 2011.03.09
M7.3 東北地方太平洋沖地震の最大前震

第2図. すべてのパネルで灰色及び色の付いた丸印は繰り返し相似地震を示す(上段地図)注目した領域. 星印は主要大地震の震央. 注目したA-Fの矩形領域で赤から青のグラデーションをつけた色の丸印と曲線は各繰り返し地震の空間位置でのすべり速度の時間経過(上部パネル)と発生時の系列(下部パネル)を示す. 縦の点線は主要大地震の発生時で, そのうえで緑の縦線は当該領域ないし近傍領域のものを示す.

Fig. 2. Gray and colored circles indicate the repeating earthquakes throughout all panels. Stars in the map of top panel represent epicenter of the major earthquake. Their occurrence times are shown by dotted and colored vertical line segments in the rest panels. Curve and circles with gradated colors from red to blue within each rectangular area of the A-F indicate time sequence of the repeating events and the corresponding time variation of the slip velocity, respectively, at each spatial position of repeating earthquakes in the rectangular regions A-F



5 第198回地震予知連絡会資料から再録

時空間非定常BPTモデルと北日本太平洋沖沈み込み帯の小繰り返し地震(1993.7.15-2011.3.10)の解析例
Nonstationary space-time BPT model, and analysis of repeating earthquakes on the upper surface of the
subducting Pacific Plate from July 15, 1993 till March 10, 2011

統計数理研究所

The Institute of Statistical Mathematics

東北大学大学院理学研究科

Graduate School of Science, Tohoku University

地震は断層を動かす応力が蓄積されて閾値に達したときに発生する。開放された応力は再び蓄積され地震を繰り返す。各活断層において発生する大地震の長期予測確率は、このような弾性反撥の仕組みを、図1に示すように、一定の速度でクーロン応力の蓄積の増加トレンドに分散摂動を加えたブラウン過程が上限閾値に達した時にすべりが起きるというモデルのもとで、繰り返す地震の発生間隔がBrownian Passage Time (BPT)分布であり、これに基づいて長期確率予測が計算される。BPT分布の発生間隔の平均値は応力の蓄積速度に反比例し、発生間隔の標準偏差 α はBrownian Passage過程の摂動の標準偏差に比例する。パラメータ α とは周辺の地震からのクーロン応力の変化の頻繁性やサイズを表現する。

このBPTモデルはプレート境界面の比較的小さな値の が考えられる周囲から相対的に孤立したアスペリティの同じスポットで起きる中小の繰り返し地震にも優れて適用することができる1)。小繰り返し地震のデータ2)でプレート境界の準静的すべりの加速・減速の時空間変動を時間変化率とし非定常なBrownian Passage過程を考えることができる(図2)。

プレート境界面の各スポットで発生する小繰り返し地震に対し、非定常BPT更新過程を拡張して時空間階層ベイズモデル(図3)を開発し、応力蓄積率の時空間的变化の推定を行った。ここで3次元B-スプライン関数で場所と時間による連続的な応力の変化を表現する。過剰な適合を避けるために、時間変動や空間変動の平滑性について制約を設定し、最適なベイズモデルはABIC最小化に従う。

これを北日本太平洋沖のプレート境界で観測された、1993年から2011年までの小繰り返し地震に当てはめた。本研究では、地震モーメントとすべり量の間関係式3)を用いてすべり量を求めた。このようにして1994年三陸はるか沖地震(M7.6)、2003年十勝沖地震(M8.0)、2004年釧路沖の地震(M7.5)、2008年福島県沖の地震(M6.9)、2008年茨城県沖の地震(M7.0)、2011年東北沖地震の前震群(M7.3など)の前と後の準静的すべり、相対的な固着域など、それぞれの特徴的な時空間変化を捉えている。

提案モデルは、GPS観測網から離れた沖合の海洋底下におけるプレート境界での、応力場の変動やプレート間カップリングの可視化とモニタリングに有用であると考えられるが、小繰り返し地震の近傍の大地震による地震時の急激な応力変化と、その前後のゆっくり滑りを分離するという課題がある。

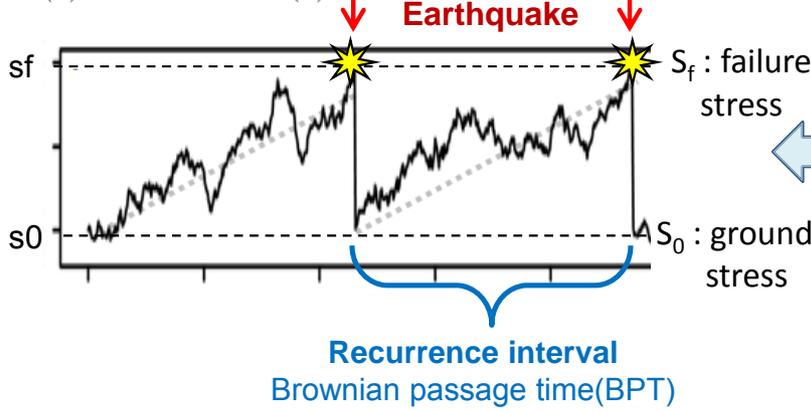
(野村俊一, 内田直希, 尾形良彦)

参考文献

- 1) 野村俊一 (2012) 総合研究大学院大学博士学位論文.
- 2) Uchida, N. et al. (2009). Earth Planet. Sci. Lett., 283, 111-121.
- 3) Nadeau and Johnson (1998) Bull. Seismol. Soc. Amer., 88, 790-814

Stationary loading rates λ and dispersions σ

$$S(t) = \lambda t + \sigma W(t)$$



参考1図。ブラウン到達過程とブラウン到達再帰時間の分布との関係の図示。

Ref-Fig. 1. Illustration of the relation between Brownian passage process and Brownian passage time distribution.

Non-stationary loading rates $\lambda(t)$ and dispersions σ

$$dS_t = \lambda_0 \lambda(t) dt + \sigma_0 \sqrt{\lambda(t)} dW_t \quad \longleftrightarrow \quad d\tilde{S}_t = \lambda_0 \tau d\tau + \sigma_0 d\tilde{W}_\tau$$

$$\tau = \Lambda(t) = \int_0^t \lambda(u) du$$

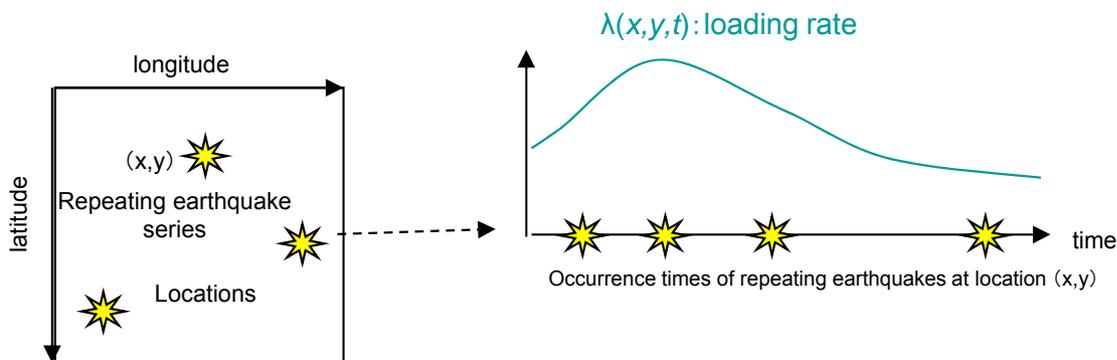
参考2図。非定常ブラウン到達過程とブラウン到達再帰時間の分布との関係の図示。

Ref-Fig. 2. Relation of nonstationary Brownian passage process to the original Brownian passage time distribution.

Non-stationary Space-Time Model

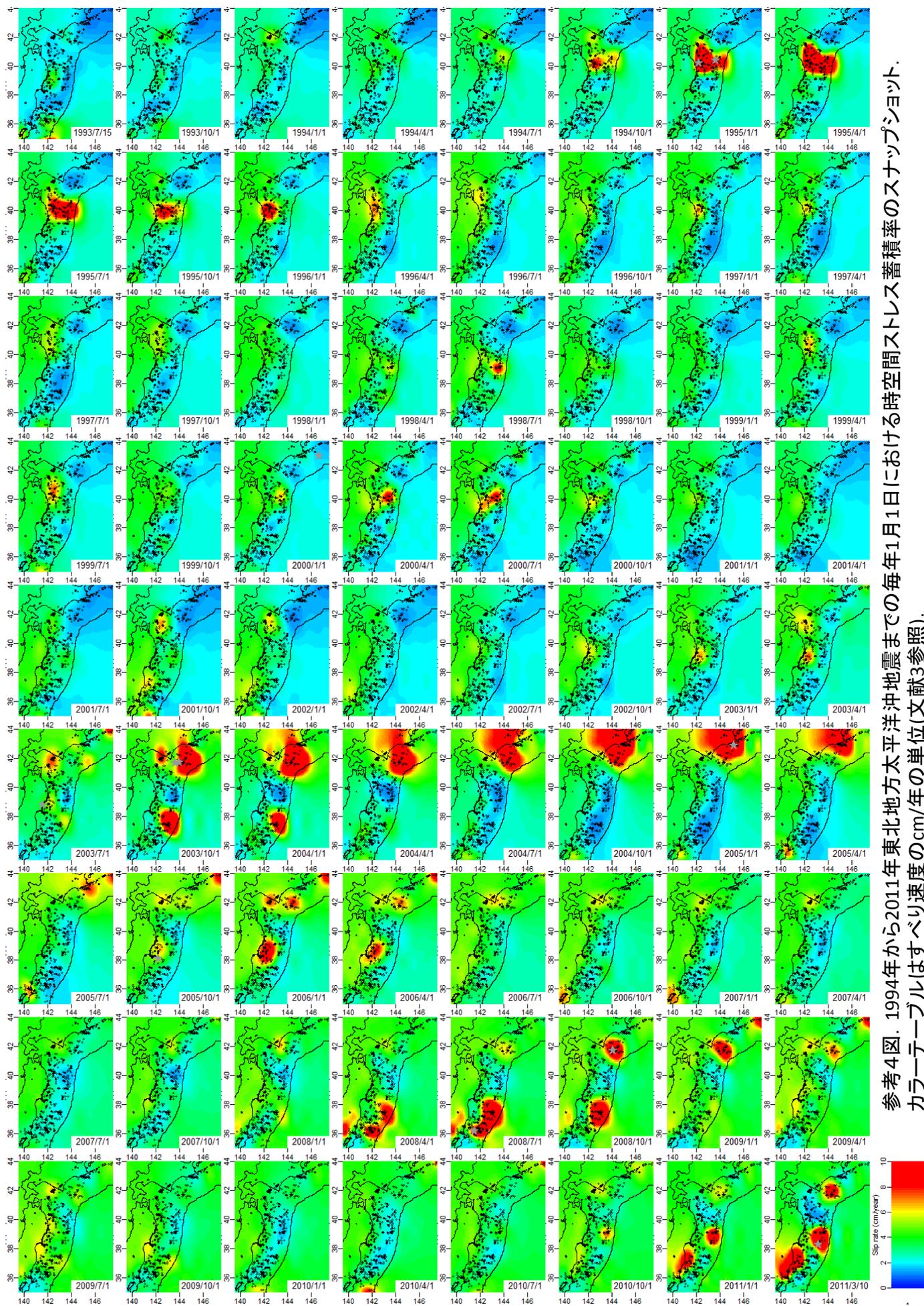
$$dS_t = \lambda_0 \lambda(x, y, t) dt + \sigma_0 \sqrt{\lambda(x, y, t)} dW_t$$

- λ_0 : Background loading rate
- σ_0 : Background perturbation rate
- $\lambda(x, y, t)$: space-time rates relative to the background loading rate λ_0



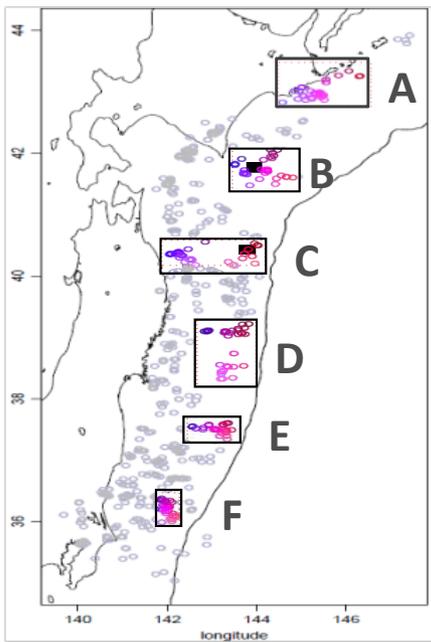
参考3図。時空間すべり率関数で特徴づけられる非定常時空間ブラウン到達過程。

Ref-Fig. 3. Illustration of the nonstationary space-time Brownian passage time model characterized by the space-time loading rate.



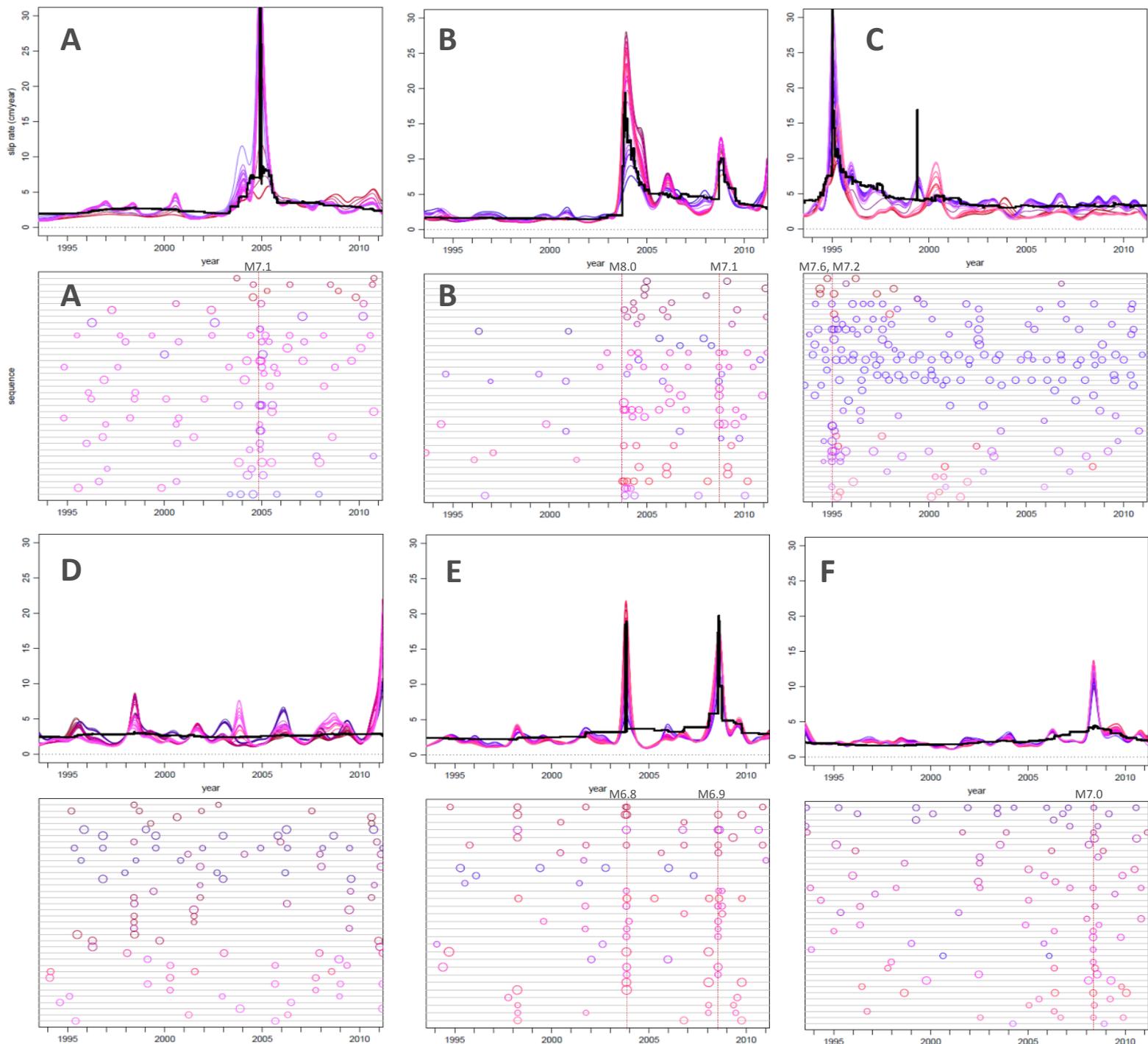
参考4図. 1994年から2011年東北地方太平洋沖地震までの毎年1月1日における時空間ストレス蓄積率のスナップショット。カラーテーブルはすべり速度のcm/年の単位(文献3参照)。

Ref-Fig. 4. Snapshots of space-time loading rate at 1st January of each year from 1994 till the 2011Tohoku earthquake. Color table in bottom right shows slip-rate with unit of cm/year (cf., reference 3).



参考5図. 赤から青のグラデーションをつけた色の丸印と曲線は左パネルのA-Fの矩形領域内の各繰り返し地震の空間位置でのすべり速度の時間経過と発生時の系列を示す.

Ref-Fig. 5. Circles and curves wearing gradient color from red to blue indicate time sequence of the repeating events and the time variation of the slip velocity, respectively, at each spatial position of repeating earthquakes in the rectangular regions A-F in the left panel.



2013年4月13日淡路島付近の地震(M6.3)までに至る兵庫県南部地震の余震活動などの異常変化について。
Long-term aftershock activity of the 1995 Kobe earthquake of M7.3 until the 13 April 2013 earthquake of M6.3 near Awaji Island

統計数理研究所
The Institute of Statistical Mathematics

1995年兵庫県南部地震の震源域における余震活動は数年後僅かながら活発化していたことを第191回 地震予知連絡会議で報告した¹⁾。第1図は本震後の同地域内の余震活動を5年後までETASモデルで当てはめ、淡路島付近の地震まで予測延長したものである。活発化が前より顕著に見える。ETAS予測に基づく変換時間に関する余震活動の時空間図によると、余震域の拡大について特徴がある。北東端では拡大(活発化)後に最大余震(M5.1)が発生している。同様に南西端への拡張(活発化)の後に今回の地震が発生している。

このような余震域拡大に伴う前駆的特徴の有無と前駆的すべりの可能なメカニズムについて、上記最大余震のケースを含む他の地震について報告している^{2, 3)}。今回の活発化についても、淡路島付近の地震の断層深部延長部ですべりがあったものとして余震活動域のCFS増加を調べ余震活発化との整合性を確認した(第1図)。同様なシナリオを与える前駆的すべりについて余震域西南端の深部も考えられ(CFS図は省略)、これは今回の地震を励起しうる(CFS図は省略)。前者がより良く説明できることを示すために、すべりによる地表の変動方向を描き(第3図)南淡GPS観測点と繋ぐ複数のGEONETの基線長の時系列を調べた(第2図)。南淡観測点から見て南北方向に伸び東西方向に縮む異常伸縮を支持するのは前者である。

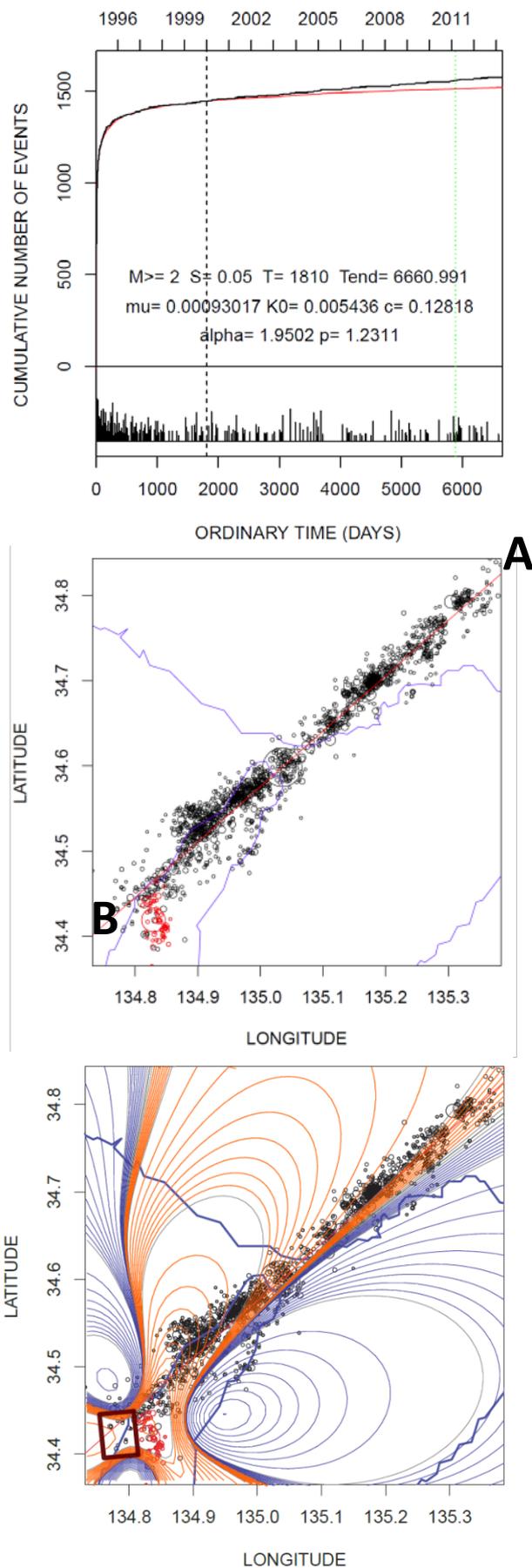
今回の地震の余震活動は、5月26日現在、マグニチュード(M)1以上はこれまでのところ順調に推移しているように見えるが、M2以上の余震は本震後半日で2/3以上起こりその後希少で、ここ一ヶ月起きていな(第3図)。今後の推移を注意深く見守る必要がある。

気象研究所の解析プログラムMICAP-Gおよび地理院のWEB地殻変動解析データを使用しました。

(尾形良彦)

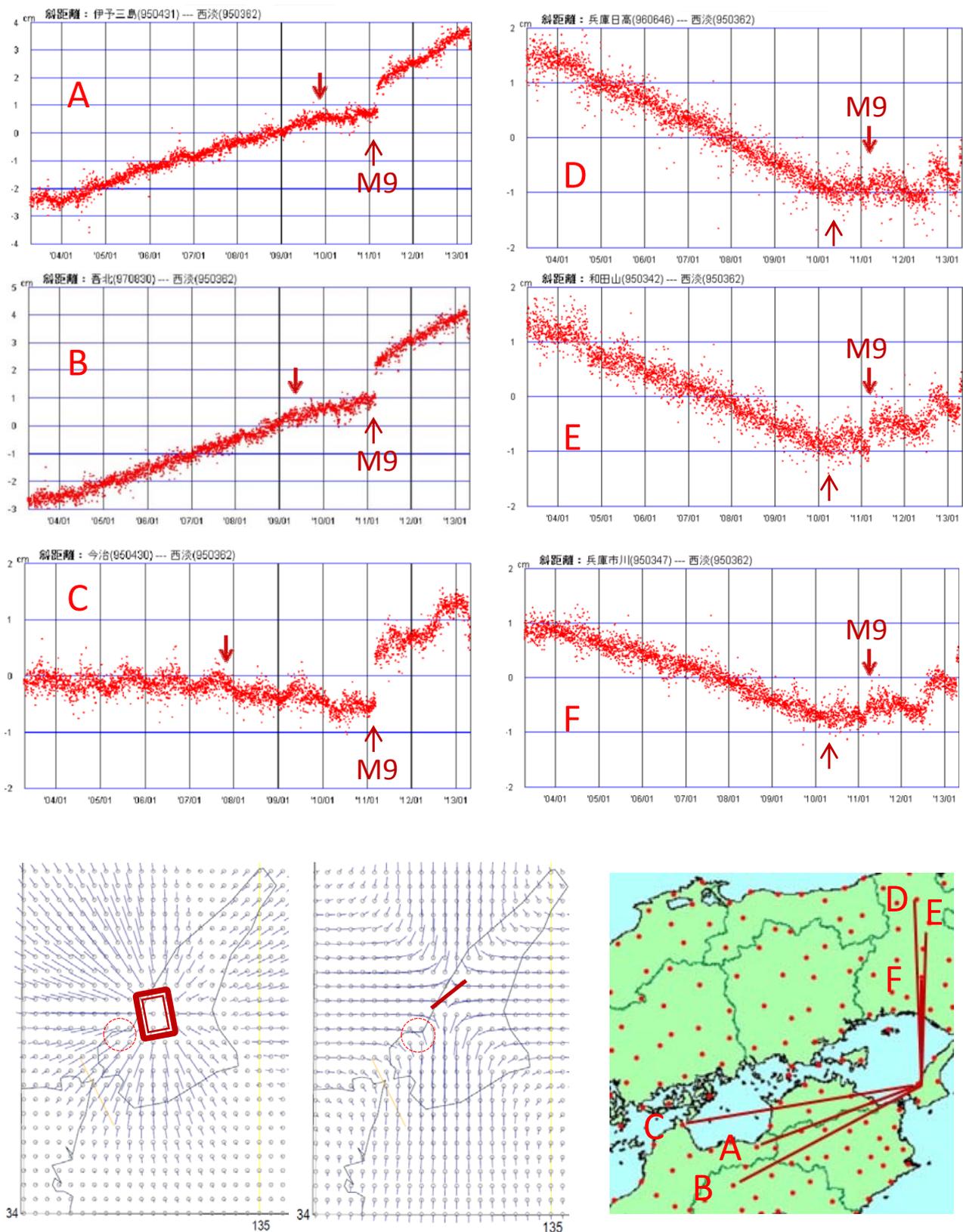
文献:

- 1) 統計数理研究所 (2012)予知連会報, 第89巻(8-2), pp. 278-281.
- 2) Ogata, Y. (2010). *Geophys. J. Int.*, 181, pp.1575-1592,
- 3) 統計数理研究所 (2011) 予知連会報, 第86巻, pp.134-141.



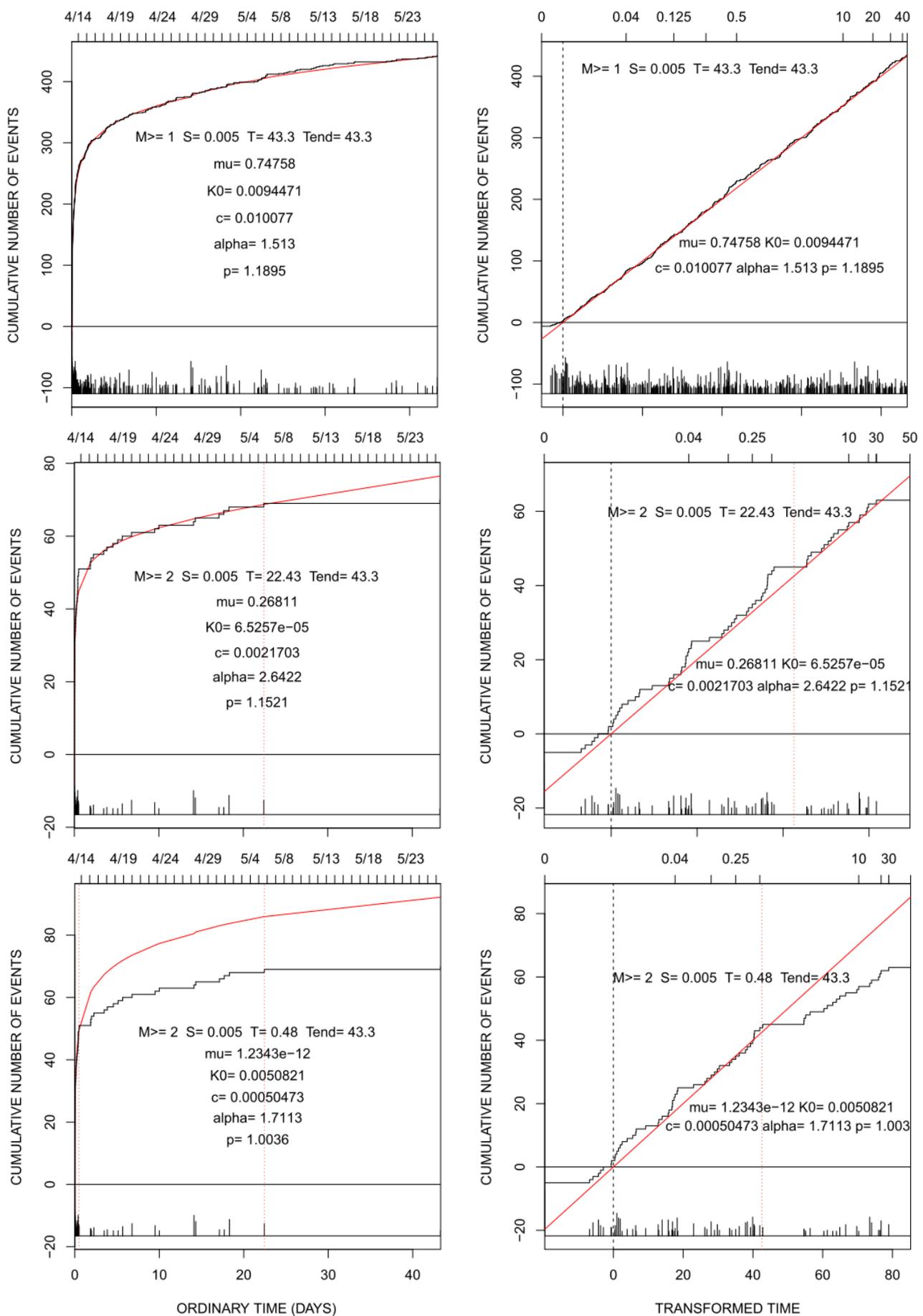
第1図。解析領域は1995年の兵庫県南部地震の余震。(上段) $M \geq 2$ の余震累積図とM-T図。本震直後0.05日から1999年末までをあてはめたETASモデルでその後を予測(赤線)。(中段左) $M \geq 2$ の地震の震央図。黒丸は兵庫県南部地震の余震で赤丸は淡路島の地震の本震と余震。(中段右) 左図の赤線に投影した上図の変換時間に関する時空間図。(下段) 淡路島の地震の深部でのすべり断層モデル (Lon, lat, dep, length, width, depth) = 134.77, 34.38, 20 km, 4.7 km, 10 km), (strike, dip, rake, slip) = (173.8, 58, 102, 100mm) をソースとして兵庫県南部地震の余震を受け手 (strike, dip, rake, slip) = (45, 90, 180), Dep = 12.5 km としたときのDCFS図 (Friction coeff. = 0.4)。

Fig. 1. (Right panels) cumulative curves and M-T diagrams of $M \geq 2$ earthquakes in the region of the Kobe earthquake aftershocks. The ETAS model estimated from 0.05 days after the main shock through 1999, and predicted that destination (red curve). It has been passed almost as expected, but become activated till the recent earthquake in the Awaji-shima. (Left map) Epicenters of the Kobe aftershocks and the Awaji-shima aftershocks (red circles),



第2図。(上6パネル)淡路島の西淡観測点を起点とした基線距離(右下図参照)の時系列(2003年3月4月14日から2013年4月27日)。上向きが伸びで下向きが縮み。(左下)第1図と同じゆっくりすべりを仮定した地表の変位方向。(中下)深さ15km, 兵庫県南部地震と同じ右横ずれを仮定した地表の変位向。

Figure 2. Top 6 panels show time series baseline distances between Seidan GPS station in Awaji Island and the other six stations (see below right) for the period from April 27 2013 to April 14 March 2003. The downward and upward direction indicates contraction and extension, respectively. (Bottom left panel) Shift directions of the surface assuming the same slow slip as in Figure 1. (Bottom middle panel) shift directions of the surface assuming the slow right-lateral strike-slip on the deeper part of the Kobe earthquake fault beneath 15 km depth in the south-west end.



第4図。2013年4月13日の淡路島付近の地震(M6.3)の余震の余震累積図とM-T図。左側は通常時間で右側は当てはめたETASモデルによる変換時間。(上段) $M \geq 1$ のデータを本震直後0.005日から5月26日までをあてはめたETASモデルの累積関数は赤線で示した。(中段左) $M \geq 2$ のデータを本震直後0.005日から5月5日までをあてはめた。(下段) $M \geq 2$ のデータを本震直後0.005日から0.5日までをあてはめた。
 Fig. 4. Cumulative functions of aftershocks of the M6.3 earthquake of the 13th of April 2013 near Awaji Island and their magnitudes against ordinary time after the mainshock (left side panels) and corresponding transformed time (right side panels) by the fitted ETAS models (M6.3) earthquake of Awaji Island near the 13th of April 2013. The red curves represent the cumulative functions of the ETAS model fitted the 26th May from 0.005 day after the main shock of the data $M \geq 1$ (top row panels); $M \geq 2$ data are fitted the up to 5th May from 0.005 day after the main shock data (middle row panels); $M \geq 2$ data are fitted up to 0.5 days from 0.005 days after the main shock data (bottom panels).